
Vers le développement de méthodes géophysiques pour la détection de racines ligneuses dans les ouvrages hydrauliques en remblai

Benjamin Mary^{1a}, Ginette Saracco², Laurent Peyras^{1a}, Patrice Meriaux^{1a}, Michel Vennetier^{1b}, Caroline Zanetti³

¹ IRSTEA, 3275 route de Cézanne, Aix-en-Provence (benjamin.mary@irstea.fr)

^{1a} UR Ouvrages hydrauliques et Hydrologie

^{1b} UR Ecosystèmes Méditerranéens et Risques

² CNRS-CEREGE, UMR 7330, Modélisation, Europole de l'Arbois, Aix en Provence

³ ArbEauSolutions, Entreprise spécialisée en conseil de gestion de la végétation sur ouvrages hydrauliques

RÉSUMÉ. Les racines d'arbre sont reconnues comme un danger lorsqu'elles poussent dans les structures en remblai d'ouvrages hydrauliques, et notamment des digues. Deux principaux risques sont associés à la présence d'arbres sur ces ouvrages : l'érosion interne liée au développement racinaire dans le corps de digue ou sa fondation et l'érosion externe relative au déracinement potentiel de grands arbres sous l'effet du courant ou du vent. L'objectif des travaux de thèse, est d'élaborer des méthodes de prospection non destructives permettant de repérer et évaluer les développements racinaires dangereux dans les ouvrages hydrauliques. Pour cela, une méthodologie couplant une approche expérimentale et de modélisation est établie dans le but de caractériser le système racinaire.

ABSTRACT. Roots are recognized as an environmental hazard when growing in hydraulic earth structures, especially dikes. Trees' rooting in earth dikes generates two types of risks: internal erosion due to root development in earth embankments or their foundation, and external erosion (slopes and crest) which is often related to trees uprooting by the effects of currents or wind. The aim of the beginning thesis, subject of this paper, is to elaborate non-destructive prospection methods able to detect and evaluate dangerous tree roots growing in dike or dam body. To this end, we have to design a methodology including non-destructive methods and geophysical models in order to characterize the root system. Several geophysical methods are often used for exploration of soil. Nevertheless, given the complex variety of bank and soil properties composing earth dikes, these non destructive methods have to be adapted and improved to detect and localize woody roots in these specific conditions.

MOTS-CLÉS : Ouvrages hydrauliques, méthodes géophysiques, détection de racines, CND.

KEY WORDS : Hydraulic structures, geophysics methods, roots detection.

1. Introduction

La France compte aujourd'hui plus de 8 000 km de digues de protection contre les inondations de cours d'eau (Fauchard and Mériaux, 2004), 6 700 km de voies d'eau navigables endiguées et plus de 1 000 km de digues d'aménagement hydraulique et de grands canaux d'irrigation, sans compter des dizaines de milliers de barrages de toutes tailles. En 2002 et 2003, les inondations dans le sud de la France ont mis en lumière les risques de défaillance des digues et les conséquences désastreuses qui en ont découlé d'un point de vue sécuritaire et économique.

1.1. Problématique

Comme pour la stabilité des terrains en pente, le rôle des arbres est ambivalent vis-à-vis de la sécurité des ouvrages hydrauliques. Les effets positifs, d'interception des pluies directes par les houppiers, de protection contre l'érosion de surface et de renforcement du sol face aux glissements superficiels, s'opposent aux effets négatifs. Deux principaux risques sont associés au développement de végétation ligneuse sur les ouvrages hydrauliques (Zanetti, 2010):

- **Le mécanisme d'érosion interne**, favorisé par la présence des systèmes racinaires qui constituent des zones d'hétérogénéité et de perméabilité dans le corps du remblai ou au contact remblai-fondation.

De leur vivant, les racines ont une action mécanique défavorable. Elles induisent (i) le décompactage des matériaux de remblai, (ii) la déstructuration des revêtements maçonnés ou bitumés, (iii) la colonisation des joints puis leur dégradation ainsi que (iv) l'élargissement des fissures.

Après décomposition, elles génèrent un risque de renard hydraulique (forme d'érosion interne) du fait de la création de conduits francs ou à perméabilité élevée favorisant les infiltrations et la circulation de l'eau, ce qui amène dans certains cas à la formation de brèches inopinées dans la digue ou le barrage sous l'effet de la charge hydraulique.

- **Le mécanisme d'érosion externe** correspondant à l'arrachement d'un arbre par le vent (chablis) ou le courant sur une digue ou un barrage, réduit ponctuellement la largeur du remblai si l'arbre se situait sur l'un des talus et/ou engendre un point bas si l'arbre occupait la crête. Il peut en résulter alors (i) un glissement du talus de l'ouvrage du fait de la rupture de pente (instabilité mécanique), (ii) un affouillement du pied ou une érosion externe du talus côté rivière ou canal de l'ouvrage par des courants tourbillonnaires, (iii) un raccourcissement du chemin hydraulique dans le remblai (ce qui renvoie à un risque d'érosion interne), voire (iv) une surverse.



Figure 1. Mécanismes d'érosions externe (à gauche) et interne (à droite) associés à la présence d'arbre sur un ouvrage hydraulique. A droite : galerie liée à la décomposition d'une racine dans des matériaux à matrice limoneuse cohésive. (Photo : Irstea - C. Zanetti)

Les remblais d'ouvrages hydrauliques constituent un substrat souvent idéal pour l'installation puis le développement d'arbres. La thèse de (Zanetti, 2010) réalisée à Irstea a établi les relations entre facteurs du milieu et développement racinaire dans les ouvrages, à l'aide de méthodes destructives. Ces travaux ont montré que le risque dépend de la structure des systèmes, de la morphologie et de la direction des racines, du degré de décomposition des racines mortes, de la dimension de l'ouvrage et de la nature des matériaux constitutifs du remblai.

On estime que les racines les plus dangereuses vis-à-vis du risque d'érosion interne sont les grosses racines primaires latérales (>30 mm) et qui traversent le corps de digue. C'est la raison pour laquelle certaines espèces telles que le peuplier sont particulièrement dangereuses puisqu'elles produisent préférentiellement ce type de racines.

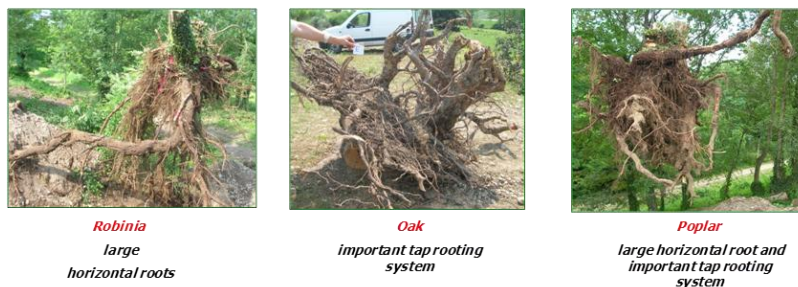


Figure 2. Extraction de système racinaire d'espèces présentes sur les digues (Robinier, chêne et peuplier) (Zanetti, 2010)

1.2. Objectifs

Il n'est pas concevable, en conditions réelles, de démanteler systématiquement des portions de digues pour extraire les systèmes racinaires. Les gestionnaires sont

donc à la recherche d'une méthode non-destructive de détection des racines dangereuses dans leurs ouvrages : c'est pour répondre à un tel besoin opérationnel qu'Irstea vient de lancer une thèse, impliquant plusieurs laboratoires du labex OT-MED : Irstea, le CEREGE et l'IFSTAR. Les trois laboratoires impliqués traduisent clairement l'interdisciplinarité du sujet de thèse qui rassemble le génie civil, la géophysique et la biologie.

L'objectif des travaux de thèse, est d'élaborer des méthodes de prospection permettant de repérer et évaluer les développements racinaires dangereux dans les ouvrages hydrauliques. Pour cela, une méthodologie couplant une approche expérimentale et de modélisation est établie dans le but de caractériser le système racinaire.

Dans cet article, nous présenterons dans une première partie l'ensemble des méthodes géophysiques envisageables en parallèle avec les résultats des études de faisabilités réalisés à l'Irstea. En seconde partie nous présenterons les perspectives les plus intéressantes compte tenu des travaux antérieurs.

2. Méthodes d'investigations géophysiques

2.1. Les méthodes géoélectriques

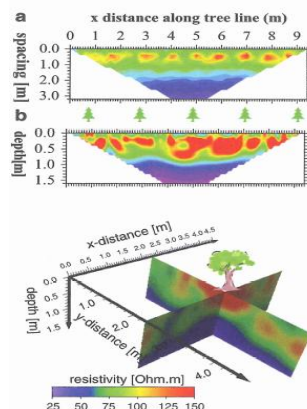
Une racine d'arbre en bonne santé est composée, de la périphérie vers le cœur, d'une couche d'écorce, de la zone cambium où les nouvelles cellules sont produites lors de sa croissance, de l'aubier et du duramen.

La racine est donc formée d'une matrice très résistive (duramen et écorce sèche) et conduit le courant électrique via les électrolytes (ions mobiles) des eaux interstitielles ou des tissus transportant la sève. C'est dans l'aubier que tous les transports d'eau et de nutriments ont lieu, assurant la conductivité électrique de la racine.

2.1.1. Tomographie de résistivité électrique

Ici, l'anomalie de résistivité recherchée correspond à la présence de racines enfouies dans un sol constituant le milieu encaissant. La stratégie de prospection doit être adaptée afin de détecter les racines principales (diamètre > 30 mm) potentiellement dangereuses. Ces racines se trouvent en majorité dans la zone superficielle jusqu'à environ 1,5 m de profondeur. Des développements récents permettant d'étudier cette zone qualifiée de vadose ou zone racinaire avec une méthode haute résolution font l'objet de publications (Mancuso, 2011).

Figure 3. En haut : Section de résistivité apparente mesurée en utilisant une configuration Wenner (a) et section inversée de la surface en dessous d'une rangée de pêcheurs. En bas : Inversion 3D de données reflétant une anomalie de haute-résistivité au niveau de la zone racinaire.



La résistivité électrique des sols à proximité des arbres est affectée par de nombreuses propriétés permanentes et dynamiques des sols (Tableau 1, Figure 4). Les zones de fortes résistivités peuvent être interprétées comme des volumes de faibles humidités à cause de l'absorption de l'eau par les racines ou comme des volumes où le flux de charges électriques est ralenti à cause des cellules mortes constituant l'écorce isolante (Werban et al., 2008).

Tableau 1. Paramètres influençant les mesures de résistivité ρ . Avec ρ_a : la résistivité dans la direction axiale, ρ_r direction radiale et ρ_t la direction tangentielle.

Paramètres (p)	Tendance de ρ ($\rho = 1/\sigma$) lorsque p augmente
Teneur en eau (θ)	ρ^{-1}
Teneur en argile/ matière organique	ρ^{-1}
Densité du bois	ρ^{-1}
Température	ρ^{-1}
Anisotropie du bois	$\rho_a \ll \rho_r < \rho_t$

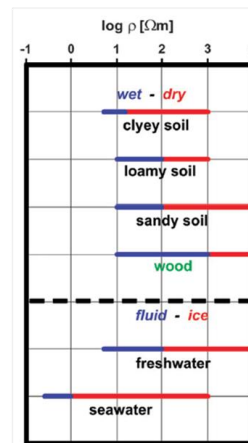


Figure 4. Gamme de résistivité ρ du bois et de différents types de sol en fonction de leurs teneurs en eau (Hagrey, 2007)

Mathématiquement, les résultats énoncés ci-dessus peuvent être trouvés à partir de la loi d'Archie suivante :

$$\sigma = k_{argile} \times \sigma_{argile} + (1 - k_{argile}) \times \frac{\sigma_w \phi^m S^n}{a}$$

Avec k_{argile} la teneur en argile, σ_w la conductivité de l'eau d'imbibition, ϕ la porosité du milieu, S la saturation du milieu. Les exposants m (de cimentation) et n (de saturation d'Archie) sont empiriques et propres à chaque roche. Ils sont influencés par la morphologie, la distribution de tailles de pores, leurs connectivités...

Dans certains cas les gammes de résistivités du sol et de la racine sont confondues. D'après la Figure 4, les gammes de résistivités se recouvrent pour du bois se situant

dans un sol argileux ou limoneux. Il est alors impossible de discriminer la réponse due au sol de celle de la racine. Afin de lever l'indétermination sur l'identification d'une racine et contourner les limites des mesures de résistivité classiques, on peut réaliser une prospection par polarisation provoquée décrite dans la partie suivante.

2.1.2. Tomographie de résistivité électrique complexe : polarisation provoquée

Dans un matériau biologique, un champ électrique alternatif provoque les phénomènes de polarisation et de relaxation qui contribuent à la formation d'un courant. Ce phénomène peut être compris par analogie à un condensateur électrique.

(Schleifer et al., 2002) montre l'efficacité de l'application de polarisation provoquée pour l'identification de bois en archéologie. L'effet de polarisation du bois est causé par les différences de mobilité des ions dans les membranes cellulaires, ce qui entraîne une séparation des charges portant différentes polarités.

$$\sigma^*(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)$$

Les mécanismes de polarisation les plus importants constatés dans un système biologique sont la polarisation d'interface (effet Maxwell-Wagner), la polarisation de dipôle et la polarisation Faradaic (ou de Warburg). Chacune d'entre elles ont un effet à différentes gammes de fréquences (Gabriel et al., 1999).

Pour décrire les propriétés électriques des matériaux, on utilise classiquement les calculs de résistivité (ou de son inverse, la conductivité). La conductivité électrique σ incluant à la fois les effets de conduction et de polarisation est présentée sous forme complexe dans le domaine fréquentiel de la façon suivante :

Avec ω la fréquence angulaire (ou pulsation), σ' et σ'' les parties réelles et imaginaires de σ^* . La composante en phase correspond à la conductivité intrinsèque alors que la composante en quadrature correspond aux effets de polarisation.

Résultats d'essais en laboratoire

L'étude menée à Irstea (Zanetti et al., 2011) a permis de tester la possibilité de détecter des échantillons de racines (fraichement coupées) dans différents milieux (sable, graves, limons). Les signaux sont enregistrés sur des échantillons de différentes espèces, pour différentes orientations, et masses de racines enfouies.

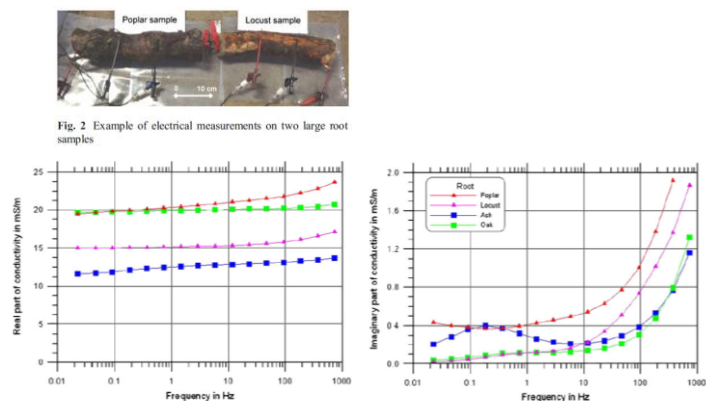


Figure 5. Mesures de conductivité complexe d'échantillons de bois fraîchement coupés (peupliers, robinier, frêne, chêne) (Zanetti et al., 2011).

Dans la plupart des cas, la présence d'échantillons de racine enterrés dans un sol augmente sa conductivité totale par rapport à son état sans racine. Cette tendance a été observée principalement dans le gravier et le sable. Lorsque les échantillons sont placés parallèlement aux électrodes, l'augmentation est d'autant plus forte. Le courant semble être guidé par les racines. Ce dernier point est essentiel pour l'identification de la direction de la racine. Cette expérience a montré que la gamme de fréquences comprise entre 1 Hz et 10 Hz semblait optimale pour de futures projections in-situ car elle provoque les meilleurs effets de polarisation.

Bien que la mesure en polarisation provoquée (PP) soit une méthode qui n'a pas été incluse dans la panoplie des prospections géophysiques pratiquées sur les digues jusqu'à présent, elle s'avère fournir des signaux plus riches que la tomographie de résistivité électrique, en particulier pour la caractérisation des systèmes racinaires.

2.1.3. Mise à la masse

La mise à la masse est un cas particulier de tomographie électrique, l'électrode d'injection de courant est plantée directement dans le corps conducteur, les électrodes de potentiels maillent le sol pour réaliser une cartographie.

Des essais de mise à la masse ont été effectués sur trois arbres au cours du stage (Renault, 2012) à Irstea et montrent que la direction des racines principales est identifiée à faible distance du tronc (<5 m). Les mesures de la (Figure 6) ont eu lieu en été sur un peuplier isolé. La résistivité du sol sur le site, à l'écart de toute végétation, était estimée à 30 Ohm.m.

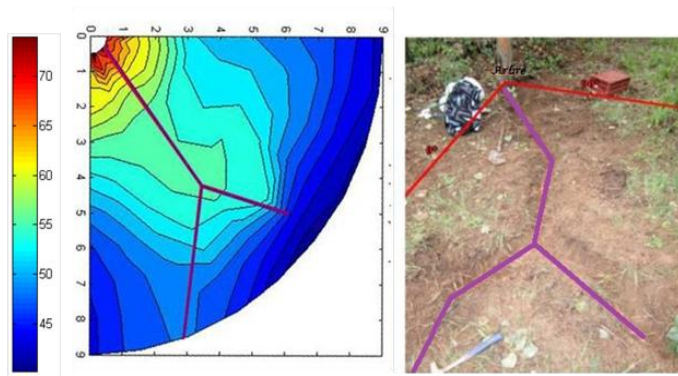


Figure 6. A gauche : Carte de résistivité apparente (Ohm.m) résultant des mesures de mise à la masse. A droite : comparaison après excavation et mise en évidence d'une racine charpentière de diamètre initiale de 6 cm (Renault, 2012)

La zone a ensuite été piochée, ce qui a permis de montrer qu'à la position de l'anomalie identifiée par les mesures de mise à la masse se trouve bien une racine dont le diamètre initial est de 6 cm.

L'hypothèse forte émise pour réaliser des essais de mise à la masse est que la racine est un conducteur homogène. Ceci implique que la racine soit active sur toute sa longueur. Les essais de mise à la masse réalisés montrent que la racine est plus résistante que le sol encaissant. Il s'agit finalement d'une mise à la masse inversée.

Bien que ces premiers résultats acquis soient intéressants, il conviendrait de multiplier des essais sur un nombre bien plus grand d'arbres pour en tirer des tendances fiables. Comme pour les mesures de résistivité, les mesures de mise à la masse vont être sensibles au type de sol, mais en priorité à l'état de la racine. Or, lors de la décomposition racinaire, c'est l'aubier, la partie active électriquement, qui est le plus vulnérable. Au fur et à mesure de sa décomposition, la racine risque de perdre sa propriété de conductivité électrique ; aussi, la méthode de mise à la masse n'est donc plus appropriée.

2.2. Les méthodes acoustiques

La méthode acoustique permet une autre approche pour la détection de racines consistant non plus à considérer la racine comme une anomalie de résistivité mais comme une anomalie de densité par rapport au milieu encaissant. Ceci permet indéniablement de s'affranchir de la relative complexité des phénomènes bioélectriques se produisant dans la racine et son interface avec le sol.

Cette méthode est mise en œuvre par une société spécialisée RINNTECH®. Le principe est relativement simple : une source impulsionnelle non normalisée (opérateur qui tape avec un marteau sur une tige de fer) transmet une vibration à

travers le sol. L'onde produite est une onde de cisaillement (de type S), la perturbation du milieu est verticale et se diffuse approximativement dans un cône d'angle 40° environ.

Si des transducteurs acoustiques directionnels de type accéléromètres, encerclent la base du tronc, ils pourront mesurer l'effet de cette vibration. L'opérateur effectue un maillage régulier en se déplaçant sur un arc de cercle à distance constante de l'arbre. Un seuil de détection fixé en amplitude permet le pointé de l'arrivée de l'onde. Une carte temps-azimut est obtenue. Il est alors possible d'estimer si une racine ou non existe dans cette direction.

Des capteurs de réception sont placés à la base du tronc. Ces capteurs sont des piezoéléments directionnels mesurant la composante verticale de l'onde et sont centrés sur la fréquence de résonnance 6 kHz. Un seuil de détection en amplitude est fixé et permet le pointé de l'arrivée de l'onde sur un récepteur. Lorsque le pointé est possible, on estime alors qu'il y a présence d'une racine, et pas dans le cas inverse. L'opérateur effectue un maillage régulier en se déplaçant sur un arc de cercle à distance constante de l'arbre. La disposition des récepteurs tout autour du tronc permet d'estimer l'azimut des principales racines.

Les profondeurs d'investigation dépendent principalement de la température, de la teneur en eau (résistance au cisaillement du sol) et de la compaction du sol. Pour un sol compact, les profondeurs d'investigation sont d'environ 1,2m tandis que pour un sol léger de 0,5m. Cependant, ces profondeurs pourraient être augmentées en générant une vibration (signal source) plus profondément.

Jusqu'à présent, les informations obtenues par cette méthode opérationnelle sont limitées à «présence de racine(s) ou non » et leurs directions. La taille et la profondeur des racines ne sont pas explicites.

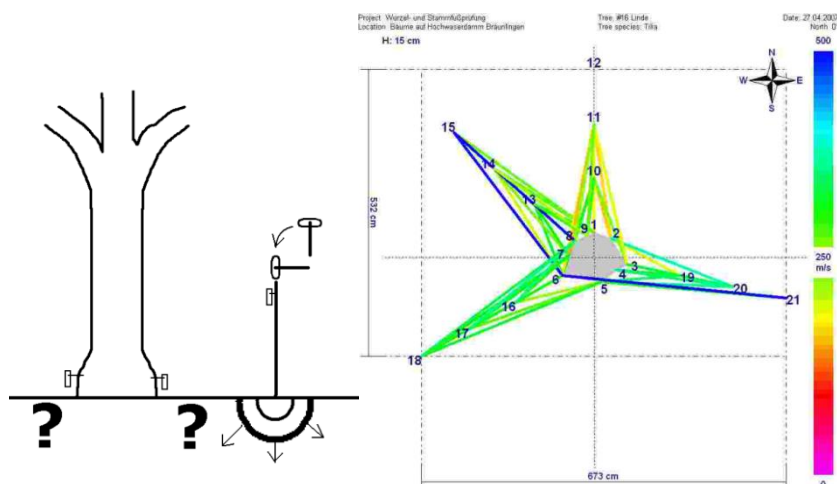


Figure 7. A gauche : schéma du dispositif avec une source impulsionnelle puis des capteurs en réception sur le tronc. A droite : vitesse de propagation en considérant des rais rectilignes des ondes guidées par une racine lorsque le seuil de détection est atteint (RINNTECH®).

Malgré les conditions difficiles d'investigation du fait de la constitution des sols des ouvrages hydrauliques en terre, cette méthode semble prometteuse pour la détection de racines. En effet, elle est non destructive, peut être pratiquée à moindre coût, et s'avère pratique dans les espaces confinés.

Cependant, pour identifier les racines potentiellement dangereuses pour le corps de digue, il faut non seulement les détecter mais aussi les localiser. L'énergie transmise au sol par la source pourrait être normalisée ou mesurée en utilisant les mêmes dispositifs que ceux des « pénétromètres dynamiques » (à énergie constante ou variable, type PANDA développé par la société SolSolutions). Dans ce cas l'information à traiter ne se limite plus au calcul des temps de trajet, mais aussi à l'étude de l'énergie transmise. En s'intéressant à l'atténuation du signal, il serait possible d'évaluer les caractéristiques mécaniques du matériau « racine », se dégradant progressivement avec sa décomposition.

Dans cette perspective, des études de calibration telles que des modèles de propagation de l'onde en fonction de la racine (diamètre, état de décomposition) seront mises en place prochainement en s'appuyant sur les études réalisées par (Brancheriau et al., 2006; Lasaygues et al., 2007).

3. Perspectives

A la suite des différentes études de faisabilité réalisées à Irstea et en s'appuyant sur les recherches bibliographiques, il est à présent possible d'entreprendre un programme d'expérimentations.

Nous privilégierons deux méthodes : i) la prospection de racines par méthode électrique et ii) la prospection par méthode acoustique.

La méthode dite de polarisation provoquée permet d'obtenir un signal riche, inexploité actuellement pour la détection de racines. Afin d'appréhender au mieux la réponse de la racine en fonction des différents paramètres (stress-hydrique, taux de décomposition ...), des expériences en milieu contrôlé (laboratoire) et semi-contrôlé vont être mises en place.

A ce stade de développement, la méthode acoustique apporte une information uniquement qualitative (présence ou non d'une racine). Cette méthode peut être considérablement améliorée afin d'obtenir des résultats quantitatifs permettant dans l'idéal d'estimer sa taille, son extension ainsi que sa profondeur. Les expérimentations ont lieu notamment en pépinière sur des arbres où l'architecture racinaire est connue. Le dispositif expérimental in-situ crée pour les expérimentations servira pour les prospections électriques et acoustiques. Si les résultats s'avèrent satisfaisants, ces essais seront étendus sur des ouvrages hydrauliques en service.

4. Bibliographie

- BRANCHERIAU, L., BAILLERES, H., DETIENNE, P., Gril, J., KRONLAND, R., 2006. Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. *Journal of Wood Science* 52, 270–273.
- FAUCHARD, C., MERIAUX, P., 2004. Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues: Guide pour la mise en oeuvre et l'interprétation. Editions Quae.
- GABRIEL, C., GABRIEL, S., CORTHOUT, E., 1999. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Physics in medicine and biology* 41, 2231.
- LASAYGUES, P., FRANCESCHINI, E., DEBIEU, E., BRANCHERIAU, L., 2007. Non-destructive diagnosis of the integrity of green wood using ultrasonic computed tomography, in: International congress on ultrasonics. Vienne, Autriche, p. CD-ROM(4 pages).
- MANCUSO, S., 2011. *Measuring Roots: An Updated Approach*. Springer.
- RENAULT, I., 2012. Détection électrique de racines vivantes : expérimentation sur le terrain (Rapport de stage de fin d'étude d'Ingénieur). IRSTEA, Aix-en-Provence,, Ecole et Observatoire de Sciences de la Terre de l'Université de Strasbourg.
- SCHLEIFER, N., WELLER, A., SCHNEIDER, S., JUNGE, A., 2002. Investigation of a Bronze Age plankway by spectral induced polarization. *Archaeological Prospection* 9, 243–253.
- WERBAN, U., ATTIA AL HAGREY, S., RABBEL, W., 2008. Monitoring of root-zone water content in the laboratory by 2D geoelectrical tomography. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 927–935.
- ZANETTI, C., 2010. Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues.
- ZANETTI, C., WELLER, A., VENNETIER, M., MERIAUX, P., 2011. Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements: a laboratory experiment. *Plant and Soil* 339, 273–283.